Iranian Journal of Field Crops Research
Homepage: https://jcesc.um.ac.ir

Research Article
Vol. 21, No. 4, Winter 2024, p. 485-500

Optimization of Nitrogen, Phosphorus, and Farmyard Manure Fertilizers Application Rates in Fodder Maize Production by Response Surface Methodology

A. Nokhbe Zaeim[1], M. Jahan[2*], A. Beheshti[3]

1- Ph.D. Student of Agroecology, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
2- Professor, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
3- Associate Professor, Agricultural and Natural Resources Research and Education Center of Khorasan-e Razavi, Agricultural- Research-Education & Extension Organization (AREEO), Mashhad, Iran
(*- Corresponding Author Email: jahan@ferdowsi.um.ac.ir)

Received: 14 June 2023 Revised: 24 July 2023 Accepted: 05 August 2023	**How to cite this article:** Nokhbe Zaeim, A., Jahan, M., & Beheshti, A. (2024). Optimization of Nitrogen, Phosphor, and Farmyard Manure Fertilizer Application in Fodder Maize Production by Response Surface Methodology. *Iranian Journal of Field Crops Research, 21*(4), 485-500. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jcesc.2023.82946.1254

Introduction

The excessive use of chemical fertilizers is a leading cause of environmental pollution in the agriculture sector. Therefore, optimizing fertilizer application is a crucial approach to boost production while minimizing environmental harm. On the other hand, application of chemical fertilizers along with manure can be considered as the proper management system that led to reduce the amount of chemical fertilizers and adverse effects on environment and also improve nutrition for plants. Response-surface methodology is a powerful tool to optimize production resources which decreases cost and time of the experiments by reducing number of them. Therefore, the aim of the study was optimization of chemical fertilizers of nitrogen and phosphorus along with manure application in fodder maize production.

Materials and Methods

The field experiment was carried out according to box-benkhen design in Savojbelagh, where located in the west of Alborz province, over two years 2017 and 2018. The fifteen treatments were selected based on low and high levels of nitrogen (0 and 300 kg.ha^{-1}), phosphorus (0 and 150 kg.ha^{-1}), and manure (0 and 40 ton.ha^{-1}). Three replications were considered in central points under box-benkhen design. The experiment was performed in two replications. Fodder yield, dry matter, nitrogen losses, and nitrogen use efficiency were the measured traits in the study. Stepwise regression model by fitting a full quadratic function were used to predict response variables. Treatments were optimized based on three scenarios: economic, environmental, and eco-environmental. Fodder yield, nitrogen losses, and nitrogen use efficiency were the primary factors used to determine the treatments in each respective scenario. In final, the optimum levels of treatments as independent variables were suggested to obtain target amounts of traits as dependent variables in each scenario. All analysis was performed using Minitab ver.16.

Results and Discussion

https://doi.org/10.22067/jcesc.2023.82946.1254

The results of regression analysis showed that the model had adequate accuracy to predict the studied properties (as dependent variables) based on experimental treatments (as independent variables). The calculated values of NRMSE illustrated that the model predicted data of dry matter, fodder yield, nitrogen losses, and nitrogen use efficiency with difference as 5.4, 2.3, 6.1, and 17.4 percent from measured data, respectively. Fodder yield was raised by increasing nitrogen fertilizer under all levels of phosphorus and manure. Increase slope of fodder yield by increasing nitrogen fertilizer amount under high levels of phosphor and manure was more than in low levels. The highest nitrogen loss was gained by application of 300 kg N.ha^{-1} along with no application of manure under nitrogen fertilizer × manure interaction. As findings, increasing the amount of nitrogen fertilizer caused to increase nitrogen losses and decrease in nitrogen use efficiency. Application of 242.42 kg N.ha^{-1} and 95.45 kg P.ha^{-1} along with 33.13 t manure.ha^{-1} was suggested under economic scenario that led to produce 105 t fodder.ha^{-1} with nitrogen losses of 150 kg.ha^{-1}. In environmental scenario, no application of nitrogen and using 146.9 kg P.ha^{-1} with 21.82 t manure. ha^{-1} was proposed to gain 80.94 t fodder and 51.2 kg. ha^{-1} as nitrogen losses and 103.03 kg fodder.kg^{-1} N as nitrogen use efficiency. Under eco-environmental scenario that had priority in comparison with two other scenarios due to considering economical and environmental issues simultaneously; applying 78.79 kg N.ha^{-1}, 150 kg P.ha^{-1}and 8.48 t manure.ha^{-1} was suggested as optimum levels of treatments that led to obtain 90.87 t fodder.ha^{-1}, 64.75 kg N losses.ha^{-1} and the highest value of nitrogen use efficiency as 116.4 kg fodder.ha^{-1} N.

Conclusion

Considering the results, applying 78.79 kg N.ha^{-1}, 150 kg P.ha^{-1}and 8.48 t manure.ha^{-1} in eco-environmental scenario was suggested as optimum levels of treatments.

Keywords: Chemical fertilizers, Environmental scenario, Nitrogen losses, Optimum values

نشریه پژوهشهای زراعی ایران

Homepage: https://jcesc.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۲۱، شماره ٤، زمستان ١٤٠٢، ص ٥٠٠-٤٨٥

بهینه‌سازی مصرف کودهای نیتروژن، فسفر و دامی در تولید ذرت علوفه‌ای با استفاده از روش سطح- پاسخ

عبدالرضا نخبه زعیم[۱]، محسن جهان[۲]*، علیرضا بهشتی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۱۴

چکیده

استفاده بهینه از نهاده‌های شیمیایی یکی از راهکارهای اساسی به‌منظور حفظ میزان تولید و کاهش آلودگی‌های زیست محیطی است. در همین راستا، هدف از این پژوهش بهینه‌سازی مصرف کودهای نیتروژن و فسفر به‌همراه کود دامی در تولید ذرت علوفه‌ای می‌باشد. برای این منظور آزمایشی در قالب طرح باکس-بنکن طراحی طی دو سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵ و ۹۷-۱۳۹۶ در مزرعه‌ای در شهرستان ساوجبلاغ استان البرز به‌اجرا درآمد. عامل‌های آزمایشی بر اساس سطوح بالا و پایین تیمارها انتخاب و در مجموع ۱۵ ترکیب تیماری (کود نیتروژن از صفر تا ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار؛ کود فسفر از صفر تا ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار و کود دامی از صفر تا ۴۰ تن در هکتار) مورد مقایسه قرار گرفتند. در این مطالعه از مدل رگرسیونی درجه دو برای برآورد مقادیر متغیرهای پاسخ استفاده شد. نتایج ارزیابی مدل رگرسیونی نشان داد که مدل از دقت کافی برای پیش‌بینی صفات مورد بررسی برخوردار بود. مقادیر تیمارها بر اساس سه سناریوی اقتصادی، زیست‌محیطی و اقتصادی-زیست‌محیطی که به‌ترتیب صفات عملکرد علوفه، تلفات نیتروژن و کارایی زراعی مصرف نیتروژن، عامل اصلی تعیین‌کننده تیمارها در هر سناریو بودند، بهینه‌سازی شدند. در سناریوی اقتصادی-زیست‌محیطی که به دلیل مدنظر قرار دادن هم‌زمان مسائل اقتصادی و زیست‌محیطی نسبت به دو سناریوی دیگر اولویت داشت؛ مصرف ۷۸/۷۹ کیلوگرم نیتروژن در هکتار، ۱۵۰ کیلوگرم فسفر در هکتار و ۸/۴۸ تن در هکتار کود دامی به‌عنوان مناسب‌ترین سطوح کود نیتروژن، فسفر و دامی در این آزمایش شناخته شد که تولید ۹۰/۸۷ تن علوفه تر در هکتار با تلفات نیتروژنی برابر با ۶۴/۷۵ کیلوگرم در هکتار و بالاترین کارایی زراعی مصرف نیتروژن معادل ۱۱۶/۴ کیلوگرم علوفه به‌ازای کیلوگرم نیتروژن را به‌همراه داشت. به‌نظر می‌رسد که مصرف توأم کودهای شیمیایی و آلی براساس مقادیر پیشنهادشده در سناریوی اقتصادی-زیست‌محیطی تحقیق حاضر را می‌توان به‌عنوان مقادیر بهینه تیمارهای کودی جهت تولید پایدار ذرت علوفه‌ای برای محل اجرای آزمایش در نظر گرفت.

واژه‌های کلیدی: تلفات نیتروژن، سناریوی زیست‌محیطی، کودهای شیمیایی، مقادیر بهینه

مقدمه

افزایش چشمگیر عملکرد گیاهان زراعی در طی چند دهۀ گذشته تا حد زیادی مرهون استفاده زیاد از کودهای شیمیایی بوده است. در چند دهۀ اخیر، مصرف کودهای شیمیایی بدون توجه به تأثیر آن‌ها بر خصوصیات خاک و محیط‌زیست، گسترش غیرقابل انکاری داشته است (Jafari Malekabadi, Afyuni, Mousavi, & Khosravi, 2004). مصرف کودهای شیمیایی از سال ۲۰۰۵ تا سال ۲۰۲۰ در جهان از ۱۵۵/۲۸ میلیون تن به ۱۹۷/۹۳ میلیون تن (افزایش ۲۷/۴۷ درصد در پانزده سال) اافزایش نشان داده است که بیشترین افزایش مصرف مربوط به کود نیتروژن بوده است که در این دوره زمانی از ۹۰/۱۳ میلیون تن به ۱۱۰/۵۴ میلیون تن رسیده است. مصرف کودهای فسفر نیز در این دوره زمانی از ۳۷/۸۹ میلیون تن به ۴۸/۳۶ میلیون تن رسیده است. در کشور ایران مصرف کودهای شیمیایی نیتروژن و فسفر در سال ۲۰۲۰ به‌ترتیب ۹۰۳ و ۱۰۹ هزار تن گزارش شده است (FAO, 2022). آلودگی‌ها و پی‌آمدهای ناشی از مصرف گسترده‌ی نهاده‌های شیمیایی سبب تغییر نگرش در زمینه تولید غذا شده است. یکی از مهم‌ترین این نگرش‌ها، تولید غذای کافی در کنار توجه به ابعاد اجتماعی، اقتصادی، زیست‌محیطی است. بیش از ۵۰ درصد نیتروژن مصرف‌شده می‌تواند از سیستم‌های کشاورزی به شکل‌های مختلف نیتروژن گازی و انواع ترکیبات نیتروژنی فعال

۱- دانشجوی دکترای اگرواکولوژی، گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- استاد، گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳- دانشیار پژوهشی، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران

(*-نویسنده مسئول: Email: jahan@ferdowsi.um.ac.ir)

https://doi.org/10.22067/jcesc.2023.82946.1254

شـده، هـدر رود (Adesemoye, Torbert, & Klopper, 2009; Jarvis, Hutchings, Brentrup, Olesen, & Van Der Hock, 2011; Weligama, Sale, Conyers, Liu, & Tang, 2010). فسفر نیز زمانی که به میزان زیادی در مقایسه با سایر عناصـر غـذایی به‌کار برده می‌شود، تا ۹۰ درصد از آن به‌صورت ترکیب با سایر عناصر در خاک رسوب می‌کند و سبب تلفات و آلودگی‌های بعـدی در منـابع آب و خاک می‌شود (Adesemoye *et al*., 2009). افـزایش مصـرف کودهای شیمیایی منجر به عدم پایداری سیستم‌های زراعی و به خطر افتادن سلامت انسان‌ها می‌شود. امروزه به علت هزینـه‌هـای سـنگین تولید و مصرف کودهـای شـیمیایی لازم اسـت کـه جـذب و مصـرف عناصر غذایی این کودها از کارایی بالایی برخوردار باشند (Fageria, 2014). بر اساس تحقیقات انجام‌شده به‌منظور تـأمین نیـاز غـلات در جهان در سال ۲۰۵۰ میانگین کارایی مصرف نیتروژن باید سالانه ۰/۱ تا ۰/۴ درصد افزایش پیدا کنـد (Doberman & Cassman, 2005). بهبود کارایی نیتروژن، آلودگی‌های زیست‌محیطی را کـاهش و درآمـد اقتصادی را افزایش می‌دهد (Fageria, 2014). استفاده از نهاده‌هـای طبیعی و کودهای دامی به‌منظور بهبـود حاصـلخیزی خـاک و تـأمین بخشی از نیازهای گیاهان به‌عنوان یکـی از اصـول کشـاورزی پایـدار مطـرح اسـت (Amiri, Jahan, & Rezvani-Moghaddam, 2022). کودهای دامی باعث اصلاح خصوصیات فیزیکی، شـیمیایی و بیولوژیکی خاک شده و در نتیجه ضمن افزایش تولید محصول، بهبود کارایی مصرف نیتـروژن را بـه دنبـال دارنـد. بنـابراین، کـاربرد تـوأم کودهای شیمیایی با مواد آلی مثل کودهای دامی، می‌تواننـد بـه‌عنـوان سیستم مدیریتی صحیح و منطقی علاوه‌بـر صـرفه‌جـویی در مصـرف کودهای شیمیایی و جلـوگیری از اثـرات زیـان‌آور آن‌هـا بـر آب‌هـای سطحی و زیرزمینی، توازن عناصر غـذایی در خـاک و گیـاه و میـزان عملکرد را در کشـت‌هـای متـوالی بهبـود بخشـد (Jahan, Nassiri Mahallati, Khalilzade, Bigonah, & Razavi, 2016).

در کشور ایران با توجه به مساحت اندک مراتع غنی و تراکم زیـاد دام در آن‌ها، تولید ذرت علوفه‌ای اهمیت ویژه‌ای دارد. میزان تولید در واحد سطح این گیاه به شدت تحت تأثیر فراهمـی عناصـر غـذایی در خاک قرار دارد. بنابراین، با توجه به مزایای استفاده از کودهای دامی و همچنـین کـاهش مصـرف کودهـای شـیمیایی بـه‌منظـور کـاهش آلودگی‌های زیست‌محیطـی و ایجـاد تعـادل تغذیـه‌ای در تولیـد ذرت علوفه‌ای، تعیین بهینه مصرف کودهای شیمیایی و دامـی بـا یکـدیگر می‌تواند بـه‌عنـوان یکـی از راهکارهـای مـؤثر در جهـت تـأمین نیـاز تغذیه‌ای گیاه و همچنین کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطـی در نظـر گرفته شود.

سادات روضاتی (Sadat-Rozati, 2008) مصـرف ۳۸۲ کیلـوگرم اوره در هکتار را به‌عنوان بهترین میزان نیتروژن برای به‌دسـت آوردن بالاترین عملکرد ذرت گزارش نمود. نتـایج بررسـی مقـدار اسـتفاده از نیتـروژن در ذرت (*Zea maize* L.) نشـان داد کـه بـا افـزایش کـود نیتروژن تا ۱۶۸ کیلوگرم در هکتار عملکـرد ذرت افـزایش مـی‌یابـد و مصرف این مقدار نیتروژن را به‌عنوان سطح مطلوب مصـرف گـزارش کردنـد (Torbert, Potter, & Morrison, 2001). آزمـایش‌هـای انجام‌شده طی سال‌های گذشته بیشتر با هدف بررسی اثرات افـزایش مصرف نیتروژن بر عملکرد گیاهان مختلف بـوده و تأکیـد انـدکی بـر تعیین میزان تلفات محیطـی از جملـه تلفـات نیتـروژن داشـته اسـت (Greer & Pittelkow, 2018)، در حالی‌که در حال حاضر، بیشتر بـر بهینه‌سازی و کاهش مصرف نیتروژن با رویکرد حفظ عملکرد گیاه بـه همـــراه کـــاهش تلفـــات و خســـارات زیســـت محیطـــی تأکیـــد مـی‌شـود (Alexandratos & Bruinsma, 2012; Gastal & Lemaire, 2002). در ایـن راسـتا زو و بـاتریچ-باهـل (Zhou & Butterbach-Bahl, 2014) میزان بهینه مصـرف کـود نیتـروژن بـه منظـور بـه حـداقل رسـاندن تلفـات نیتـروژن در تولیـد ذرت را ۱۷۸ کیلوگرم نیتروژن در هکتار به‌دست آورده و بیان کردند که بـا مصـرف این مقدار نیتروژن، ۹۰ درصد بیشترین عملکرد حاصل می‌شود.

روش سطح-پاسخ، مجموعه‌ای از روش‌هـای آمـاری و ریاضـی است که برای آنالیز و مدل‌سازی پاسخ‌هـای یـک فرآینـد اسـتفاده می‌شود و هدف نهـایی آن بهینـه‌سـازی فرآینـد اسـت (Myers & Montgomery, 1995). روش سطح پاسخ یک ابزار قدرتمنـد بـرای مدل‌سازی و بهینه‌سازی منابع می‌باشد که می‌تواند بـا کـاهش تعـداد آزمایشـات منجـر بـه کـاهش هزینـه و زمـان شـود (Cojocaru & Zakrzewska-Trznadel, 2007; Kalavathy, Regupathib, Pillai, & Miranda, 2009). بهینـه‌سـازی اسـتفاده از کودهـای شیمیایی با استفاده از روش سطح-پاسخ برای گیاهان مختلف از جمله گنـدم (Jahan *et al*., 2016; Jahan, & Amiri, 2018) کلـزا (Koocheki, Nassiri Mahallati, Moradi, & Mansouri, 2013) و پیاز (Mansouri, Bannayan, Rezvani Moghaddam, & Lakzian, 2014) ارائـه شـده اسـت. از آن‌جـا کـه در زمینـه بهینه‌سازی مصرف کودهای شیمیایی بـه‌ویـژه بررسـی اثـر تلفیقـی کودهای شیمیایی با کود دامی با استفاده از الگوها و مدل‌های ریاضی مبتنی بر داده‌های تجربی، پژوهش چندانی بر روی گیاه ذرت صورت نگرفته است، بنابراین، تحقیق حاضـر بـا هـدف بهینـه‌سـازی مقـدار مصرف کودهای شیمیایی نیتروژن و فسفر و کود گاوی در تولید ذرت علوفه‌ای در راستای کاهش آلودگی‌هـای زیسـت‌محیطـی بـه همـراه حصول عملکرد قابل‌قبول، طراحی و اجرا شد.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در مزرعه‌ای در شهرستان ساوجبلاغ در غرب اسـتان البرز، واقع در طـول جغرافیـایی ۵۰درجـه و ۳۸/۴۰ شـرقی و عـرض جغرافیایی ۳۵درجه و ۳۷/۵۶ شمالی و ارتفاع از سطح دریا ۱۲۴۰متر و

با استفاده از روش سطح –پاسخ و در قالب طرح باکس– بنکن (Karmoker, Hasan, Ahmed, Saifuddin, & Reza, 2019) در بهار سال ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ اجرا شد. با استفاده از طرح باکس– بنکن این امکان فراهم می‌شود که بیشترین اطلاعات را از حداقل عملیات اجرایی از طریق توزیع نقاط آزمایشی در محدوده‌ی تیمارها به‌دست آورد. بر این اساس، تیمارهای آزمایشی با توجه به سطوح بالا و پایین کود نیتروژن (صفر و ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار)، کود فسفر (صفر، ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار) و کود دامی (صفر و ۴۰ تن در هکتار) برای گیاه ذرت توسط نرم‌افزار Minitab تعیین گردید که در مجموع ۱۵ ترکیب تیماری با سه تکرار برای نقطه مرکزی حاصل شد (جدول ۱).

همچنین کل آزمایش در دو تکرار و دو سال متوالی اجرا شد. در طرح باکس– بنکن، تیمارهای آزمایشی به‌صورت کدهای بدون واحد ۱+، ۱– و صفر نشان داده می‌شوند که به‌ترتیب بیانگر سطوح بالا، پایین و میانگین متغیرهای مستقل می‌باشند.

قبل از کاشت نمونه‌ای از خاک مزرعه مورد آزمایش به‌صورت تصادفی انتخاب و جهت تعیین میزان عناصر موجود، pH و EC و بافت خاک به آزمایشگاه خصوصی خاک‌شناسی البرز آزما واقع در کرج منتقل شد (جدول ۲). همچنین خصوصیات شیمیایی کود دامی مورد استفاده شامل EC، pH و میزان عناصر غذایی موجود در آن در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد (جدول ۳).

جدول ۱- ضرایب و ترکیب‌های تیماری طراحی‌شده در طرح باکس- بنکن

Table 1- Coefficients and treatments in box-behnken design

Runs	Coefficients ضرایب			Value مقدار		
	نیتروژن (Nitrogen) (x_1)	فسفر (Phosphor) (x_2)	کود دامی (Manure) (x_3)	نیتروژن (Nitrogen) (kg.ha^{-1})	فسفر (Phosphor) (kg.ha^{-1})	کود دامی (Farmyard manure) (t.ha^{-1})
1	-1	-1	-1	0	0	0
2	+1	-1	-1	300	0	0
3	-1	+1	-1	0	150	0
4	+1	+1	-1	300	150	0
5	-1	-1	+1	0	0	40
6	+1	-1	+1	300	0	40
7	-1	+1	+1	0	150	40
8	+1	+1	+1	300	150	40
9	-1	0	0	0	75	20
10	+1	0	0	300	75	20
11	0	-1	0	150	0	20
12	0	+1	0	150	150	20
13	0	0	-1	150	150	0
14	0	0	+1	150	75	40
15	0	0	0	150	75	20

جدول ۲- خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک مزرعه مورد آزمایش برای کشت ذرت

Table 2- Physicochemical characteristics of soil for maize sowing

سال Year	بافت Texture	نیتروژن N (٪)	فسفر P(ppm)	پتاسیم K(ppm)	EC (dS.m^{-1})	pH	ماده آلی OM(٪)
2016	Loamy-sandy	0.11	9.61	349	0.6	7.83	1.1
2017	Loamy-sandy	0.103	10.88	214	0.91	7.80	0.96

جدول ۳- خصوصیات شیمیایی کود گاوی مورد استفاده برای کشت ذرت

Table 3- Chemical characteristics of used farmyard manure for maize sowing

سال Year	نیتروژن N(٪)	فسفر P(ppm)	پتاسیم K(ppm)	منگنز Mn(ppm)	روی Zn(ppm)	مس Cu(ppm)	آهن Zn(ppm)	EC (dS.m^{-1})	pH	ماده آلی (٪)OM	C/N
2016	1.89	1.10	4.21	510.34	289.4	70.1	3947.4	9.73	9.31	51.12	13.52
2017	1.95	0.92	3.49	460.43	296.3	67.9	4657.94	9.80	9.24	50.06	12.83

بعد از آماده‌سازی زمین، کاشت بذور ذرت سینگل کراس ۷۰۴ (دیررس با میانگین طول دوره رویش برای دانه ۱۳۰-۱۴۵ روز و برای علوفه ۹۰-۱۱۰ روز، میانگین وزن هزار دانه ۳۰۰-۳۵۰ گرم، میانگین ارتفاع بوته ۳۰۰ سانتی‌متر) در کرت‌های ۵×۴ متر با فاصله ردیف ۶۰ سانتی‌متر (۶ ردیف در هر کرت) با تراکم ۱۰ بوته در هر مترمربع انجام گرفت. تاریخ کاشت در سال ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ به‌ترتیب در ششم و هشتم خرداد ماه انجام گرفت. آبیاری بلافاصله پس از کاشت و پس از آن هر ۷ روز یکبار انجام شد. در کرت‌های دارای کود نیتروژن، یک سوم کود نیتروژن از منبع اوره در زمان کاشت و دو سوم باقی‌مانده کود به‌صورت سرک در مرحله ۹-۷ برگی مصرف شد (Mirzashahi & Hossainpour, 2014). تمام کود فسفر از منبع سوپر فسفات تریپل با توجه به تیمارهای مورد نظر یک ماه قبل از کاشت به کرت‌های مربوطه اضافه و با خاک مخلوط شد. به منظور اعمال کود آلی، کود دامی بر مبنای ۲۰ و ۴۰ تن در هکتار یک ماه قبل از کشت به‌طور یکنواخت در سطح کرت‌های مورد نظر پخش گردید. مبارزه با علف‌های هرز در طی فصل رشد و به‌صورت دستی انجام گرفت و در طی فصل رشد از هیچ‌گونه علف‌کشی استفاده نشد. در مرحله ظهور گل نر (VT) مساحت برگ‌های بوته‌های واقع در مساحت ۰/۵ × ۰/۵ متر از هر کرت با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری سطح برگ شرکت دلتا تی انگلستان در آزمایشگاه باغبانی پردیس کشاورزی دانشگاه تهران واقع در کرج اندازه‌گیری و سپس شاخص سطح برگ (LAI) محاسبه شد. برداشت محصول علوفه در مرحله خمیری دانه (R4) در تاریخ دوم مهر ماه ۱۳۹۵ و سوم مهر ماه ۱۳۹۶ انجام شد. برای تعیین عملکرد نهایی، دو ردیف کناری و نیم متر از ابتدا و انتهای هر کرت به‌عنوان اثر حاشیه حذف و بقیه به‌عنوان عملکرد نهایی گزارش شد. برای تعیین وزن خشک، بوته‌های برداشت‌شده به آزمایشگاه باغبانی پردیس کشاورزی دانشگاه تهران واقع در کرج منتقل و به مدت دو روز در دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد در آون خشکانده و سپس توزین شدند.

پس از برداشت نهایی، نمونه‌برداری از گیاهان هر تیمار به‌منظور تعیین محتوای نیتروژن گیاه انجام شد. برای تعیین درصد نیتروژن نمونه‌ها از روش هضم تر (Nelson & Somers, 1973) در آزمایشگاه خصوصی شرکت خاک بهین آزما (کرج) استفاده گردید. پس از اتمام آزمایش، میزان نیتروژن موجود در خاک با نمونه‌گیری از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک تعیین شد. تلفات نیتروژن نیز از طریق رابطه (۱) محاسبه شد (Jarvis *et al*., 2011):

$$N_{loss} = N_{initial} + Nf_{ertilizer} + N_{manure} - (N_{plant} + N_{soil}) \qquad (۱)$$

که در آن، N_{loss}: تلفات نیتروژن ($kg.m^{-2}$)؛ $N_{initial}$: نیتروژن موجود در خاک در ابتدای فصل رشد ($kg.m^{-2}$)؛ $N_{fertilizer}$: نیتروژن مصرفی از طریق کود اوره ($kg.m^{-2}$)؛ N_{manure}: نیتروژن مصرفی از طریق کود دامی ($kg.m^{-2}$)؛ N_{plant}: میزان نیتروژن گیاه در انتهای فصل رشد ($mg.g^{-1}$) و N_{soil}: نیتروژن موجود در خاک پس از برداشت محصول ($kg.m^{-2}$). تمام متغیرها بر اساس واحد کیلوگرم نیتروژن در هکتار محاسبه شدند. جهت محاسبه کارایی زراعی مصرف نیتروژن (ANUE[1]) نیز از رابطه (۲) استفاده شد (Rathke, Behrens, & Diepenbrock, 2006).

$$ANUE = \frac{Yield}{N_{initial}+N_{fertilizer}+N_{manure}} \qquad (۲)$$

که در این معادله Yield: عملکرد ذرت علوفه‌ای (کیلوگرم در هکتار) بود.

مقادیر بهینه مصرف کود نیتروژن، فسفر و همچنین کود دامی بر اساس سه سناریوی اقتصادی، زیست‌محیطی و اقتصادی-زیست‌محیطی محاسبه شد. بدین منظور، در سناریوی اقتصادی، عملکرد علوفه؛ در سناریوی زیست‌محیطی، تلفات نیتروژن و در سناریوی اقتصادی-زیست‌محیطی، کارایی زراعی استفاده از نیتروژن به‌عنوان عوامل اصلی تعیین‌کننده مقدار بهینه منابع مورد استفاده در نظر گرفته شدند. جهت برازش داده‌ها، معادله رگرسیونی چند جمله‌ای درجه دو کامل[2] که شامل روابط خطی، درجه دو و اثر متقابل بین متغیرها هست، به‌کار گرفته شد (رابطه ۳).

$$y_i = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4{x_1}^2 + a_5{x_2}^2 + a_6{x_3}^2 + a_7x_1x_2 + a_8x_1x_3 + a_9x_2x_3 \qquad (۳)$$

در این معادله y_i متغیر وابسته شامل عملکرد علوفه، تلفات نیتروژن و کارایی زراعی مصرف نیتروژن؛ x_1، x_2 و x_3 به‌ترتیب متغیرهای مستقل کود نیتروژن، کود فسفر و کود دامی و a_i ضرایب معادله می‌باشند. به‌منظور ارزیابی مدل و مقایسه نتایج مدل با مقادیر مشاهده‌شده از خط ۱:۱، ضریب تبیین و همچنین از جذر میانگین مربعات خطای نرمال‌شده (NRMSE)[3] استفاده شد (رابطه ۴):

$$NRMSE\ (\%) = \frac{100}{\bar{O}} \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{n}} \qquad (۴)$$

P_i: مقادیر پیش‌بینی‌شده، O_i: مقادیر اندازه‌گیری‌شده، n: تعداد مشاهدات و $\bar{O}$: میانگین داده‌های اندازه‌گیری‌شده. تعیین ترکیب تیمارها و همچنین تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایش با استفاده از نرم‌افزار Minitab Ver.16 انجام گرفت. لازم به ذکر است با توجه به این‌که اثر سال معنی‌دار نبود، آزمون یکنواختی واریانس خطای دو سال با استفاده از آزمون بارتلت انجام و پس از اطمینان از یکنواختی واریانس خطای دو سال، داده‌ها به‌صورت میانگین دو سال گزارش شدند.

1- Agronomical Nitrogen Use Efficiency
2- Full quadratic polynomial equation
3- Normalized Root Mean Square Error (NRMSE)

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس مدل رگرسیون درجه دو کامل و اجـزای آن شامل جزء خطی، درجه دو و اثر متقابل بین تیمارها در جدول ۴ آمـده است. بر اساس نتایج تجزیه واریانس، مدل رگرسیون درجه دو کامـل برای تمام صفات مورد بررسی در سطح احتمال ۱ درصـد ($p \leq 0.01$) معنی‌دار بود. درخصوص بررسـی اجـزای مـدل، نتـایج نشـان داد کـه اجزای خطی، درجه دو و اثر متقابل مدل بر تمام صفات به‌غیـر از اثـر متقابل تیمارها بر عملکرد علوفه معنی‌دار بود (جدول ۴).

ضرایب تبیین رگرسیون برای متغیرهای وابسـته شـاخص سـطح برگ، ماده خشک، عملکرد علوفه، تلفـات نیتـروژن و کـارایی زراعـی مصرف نیتروژن به‌ترتیب برابـر بـا ۹۸/۵۱، ۸۴/۴۱، ۹۰/۷۹، ۹۶/۱۹ و ۸۳/۸۲ درصد بود که درصد تغییرات هر یک از صفات را با اسـتفاده از مدل رگرسیونی توجیه می‌کند (جدول ۵).

مقادیر محاسبه‌شده برای شاخص NRMSE نشان داد کـه مـدل رگرسیونی برآورد مناسبی برای پیش‌بینـی مقـادیر متغیرهـای وابسـته داشت؛ به‌طوری‌که مدل صفات شاخص سـطح بـرگ، مـاده خشـک، عملکرد علوفه، تلفات نیتروژن و کـارایی زراعـی مصـرف نیتـروژن را به‌ترتیب با اختلاف ۴/۰۴، ۵/۴۷، ۸/۱۷، ۶/۱۴ و ۱۷/۴۱ درصد نسـبت به داده‌های اندازه‌گیری‌شده شبیه‌سازی می‌کند (شکل ۱).

جدول ٤- تجزیه واریانس رگرسیونی مدل درجه دو کامل به همراه اجزای مدل برای صفات مورد بررسی ذرت علوفه‌ای

Table 4- Variance analysis of full quadratic regression model along with its components for studied traits of fodder maize

منابع تغییر S.O.V.	درجه‌آزادی (df)	شاخص سطح برگ LAI	ماده خشک Dry matter	عملکرد علوفه Fodder yield	تلفات نیتروژن N losses	کارایی زراعی مصرف نیتروژن ANUE
Block بلوک	1	0.049**	7.65ns	62.59**	17.9ns	171ns
Regression رگرسیون	9	0.796**	76.0**	449.2**	6949**	5595**
Linear خطی	3	2.37**	188**	1301**	17169**	9278**
نیتروژن (N)	1	6.10**	494**	3258**	41494**	18858**
فسفر (P)	1	0.062**	17.32*	62.67**	915**	245ns
کود دامی (M)	1	0.947**	54.45**	584**	9099**	8732**
Quadratic درجه دو	3	0.008*	26.29**	34.98*	1084**	2539*
N×N	1	0.0001ns	12.72ns	100**	168ns	5192**
P×P	1	0.017*	20.65*	4.31ns	8.7ns	1592ns
M×M	1	0.005ns	55.58**	6.98ns	2957**	434ns
Interaction اثرمتقابل	3	0.009*	12.84*	10.88ns	2593**	4967**
N×P	1	0.001ns	0.376ns	1.39ns	48.3ns	170ns
N×M	1	0.021**	34.24**	28.12*	7717**	14732**
P×M	1	0.006ns	3.92ns	3.12ns	15.5ns	100ns
Error اشتباه	19	0.002	4.14	7.30	84.3	513

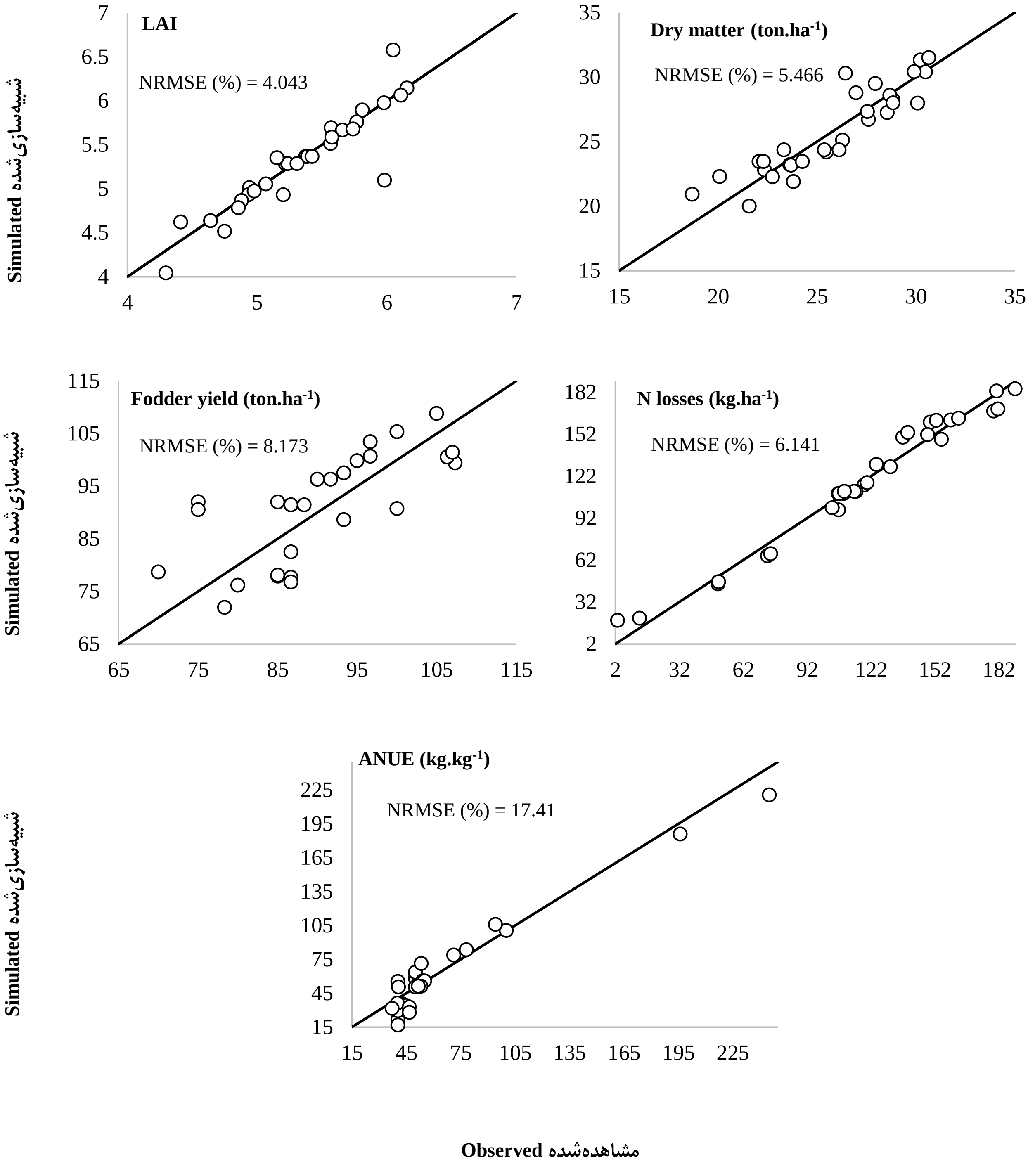
ns: عدم معنی‌داری. *,**: به‌ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

ns: no significant. *,**: significant at 5% and 1% of probability.

جدول ۵- ضرایب رگرسیون درجه دو کامل برای صفات مورد مطالعه ذرت علوفه‌ای

Table 5- The coefficients of full quadratic regression for studied traits of fodder maize

ضرایب Coefficients	شاخص سطح برگ LAI	ماده خشک Dry matter	عملکرد علوفه Fodder yield	تلفات نیتروژن N losses	کارایی زراعی مصرف نیتروژن ANUE
a_0	5.3253	26.567	88.889	110.259	53.483
a_1	0.6177	5.5612	14.270	50.925	-34.331
a_2	0.0621	1.0405	1.9792	-7.563	3.9171
a_3	0.2433	1.8448	6.0417	23.847	-23.361
a_4	-0.0044	1.3127	3.6806	-4.772	26.515
a_5	0.0478	1.6723	0.7639	1.086	-14.684
a_6	-0.0261	2.7434	0.9722	20.012	7.6730
a_7	-0.0124	-0.2169	0.4167	2.456	-4.6111
a_8	-0.0512	2.0688	1.8750	-31.058	42.913
a_9	-0.0266	-0.6998	0.6250	1.392	0.0456
R^2 (%)	98.51	84.41	90.79	96.19	83.82

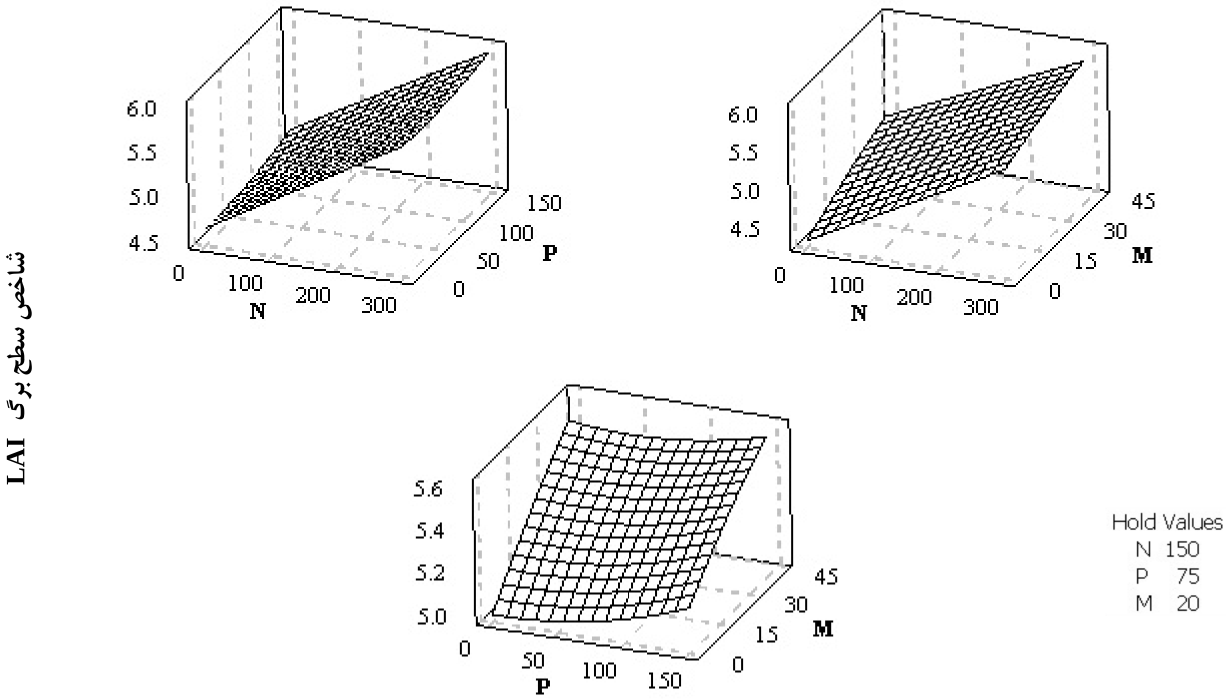


شکل ۱- مقایسه مقادیر مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده صفات شاخص سطح برگ، ماده خشک، عملکرد علوفه، تلفات نیتروژن و کارایی زراعی مصرف نیتروژن با استفاده از خط ۱:۱ و جذر میانگین مربعات خطای نرمال‌شده (NRMSE)

Figure 1-Comparison of observed and simulated data of LAI, dry matter, fodder yield, N losses and ANUE by 1:1 line and Normalized Root Mean Square Error (NRMSE)

شاخص سطح برگ

سطح پاسخ متغیر وابسته شاخص سطح برگ تحت تأثیر اثرات متقابل دوگانه تیمارهای مختلف کود نیتروژن × فسفر، نیتروژن × دامی و فسفر × دامی در شکل ۲ نشان داده شده است. بررسی اثر متقابل نیتروژن × فسفر بر شاخص سطح برگ نشان داد که با افزایش سطح کود نیتروژن در تمام سطوح فسفر، شاخص سطح برگ افزایش یافت، درصورتی‌که افزایش میزان کود فسفر در سطوح مختلف نیتروژن تأثیر چندانی در شاخص سطح برگ نداشت و میزان شاخص سطح برگ با افزایش سطوحی کودی فسفر اندکی افزایش نشان داد (شکل ۲). همین روند درخصوص اثر متقابل فسفر× کود دامی نیز مشاهده شد و افزایش کود دامی منجر به افزایش شاخص سطح برگ در تمام سطوح فسفر گردید، درصورتی‌که افزایش فسفر بر شاخص سطح برگ در سطوح مختلف کود دامی اثر چندانی نداشت و فقط در سطوح پایین کود دامی، افزایش فسفر منجر به افزایش اندکی در شاخص سطح برگ داشت و در سطوح بالای کود دامی تقریباً بی‌تأثیر بود (شکل ۲). بررسی اثر متقابل کود نیتروژن × کود دامی بر شاخص سطح برگ حاکی از این بود که با افزایش سطح کود نیتروژن در تمام سطوح کود دامی، شاخص سطح برگ افزایش یافت، همچنین افزایش میزان کود دامی در سطوح مختلف نیتروژن نیز منجر به افزایش شاخص سطح برگ گردید با این تفاوت که شیب افزایش شاخص سطح برگ با افزایش سطوح کود نیتروژن در مقایسه با کود دامی بیشتر بود؛ به عبارت دیگر افزایش کود نیتروژن نسبت به کود دامی تأثیر بیشتری بر میزان شاخص سطح برگ داشت (شکل ۲).



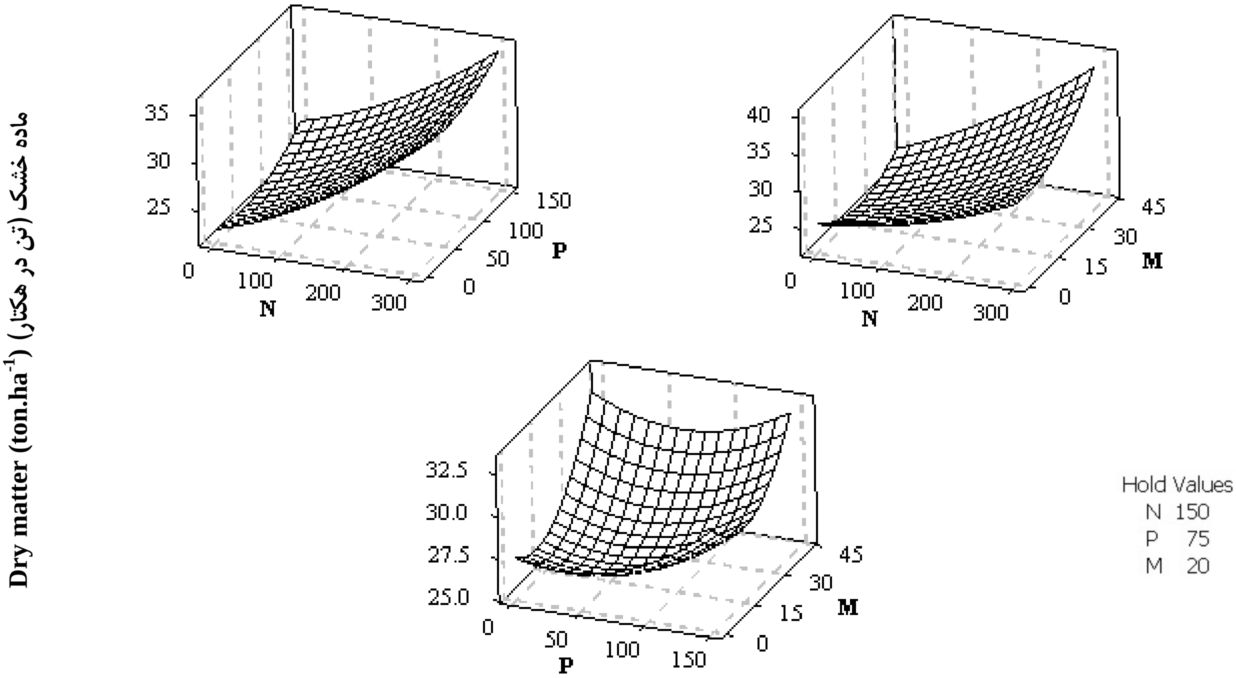
شکل ۲- نمودار سطح-پاسخ شاخص سطح برگ تحت تأثیر اثر متقابل دوگانه تیمارهای کود نیتروژن (N، کیلوگرم در هکتار)، فسفر (P، کیلوگرم در هکتار) و کود دامی (M، کیلوگرم در هکتار)

Figure 2- Response-surface plot of LAI as affected by interaction of nitrogen (N, kg.ha^{-1}), phosphor (P, kg.ha^{-1}) and manure (M, kg.ha^{-1})

ماده خشک

بر همکنش تیمارهای نیتروژن × فسفر بر میزان ماده خشک ذرت علوفه‌ای نشان داد که افزایش فسفر در تمام سطوح نیتروژن تأثیر چندانی بر میزان ماده خشک نداشت، در حالی‌که افزایش کود نیتروژن در تمام سطوح کود فسفر، منجر به افزایش ماده خشک ذرت گردید (شکل ۳). درخصوص اثر متقابل نیتروژن × کود دامی نیز نتایج حاکی از آن بود که افزایش میزان کود دامی در سطوح پایین کود نیتروژن

تأثیری در میزان ماده خشک نداشت، ولی در سطوح بالای کود نیتروژن، افزایش کود دامی منجر به افزایش ماده خشک ذرت علوفه‌ای می‌شود که چنین روندی برای کود نیتروژن در سطوح کود دامی نیز مشاهده شد؛ به عبارت دیگر، در سطوح پایین کود دامی، افزایش میزان کود نیتروژن منجر به افزایش اندکی در میزان ماده خشک می‌شود، ولی در سطوح بالای کود دامی افزایش میزان مصرف کود نیتروژن باعث افزایش قابل‌توجهی در میزان ماده خشک می‌گردد (شکل ۳). خودشناس و همکاران (Khodshenas, Ghadbeiklou, & Dadivar, 2016) نیز در بررسی اثر نیتروژن بر ماده خشک ذرت علوفه‌ای گزارش کردند که با افزایش میزان مصرف کود نیتروژن تا ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار، ماده خشک ذرت علوفه‌ای روند افزایشی داشت.



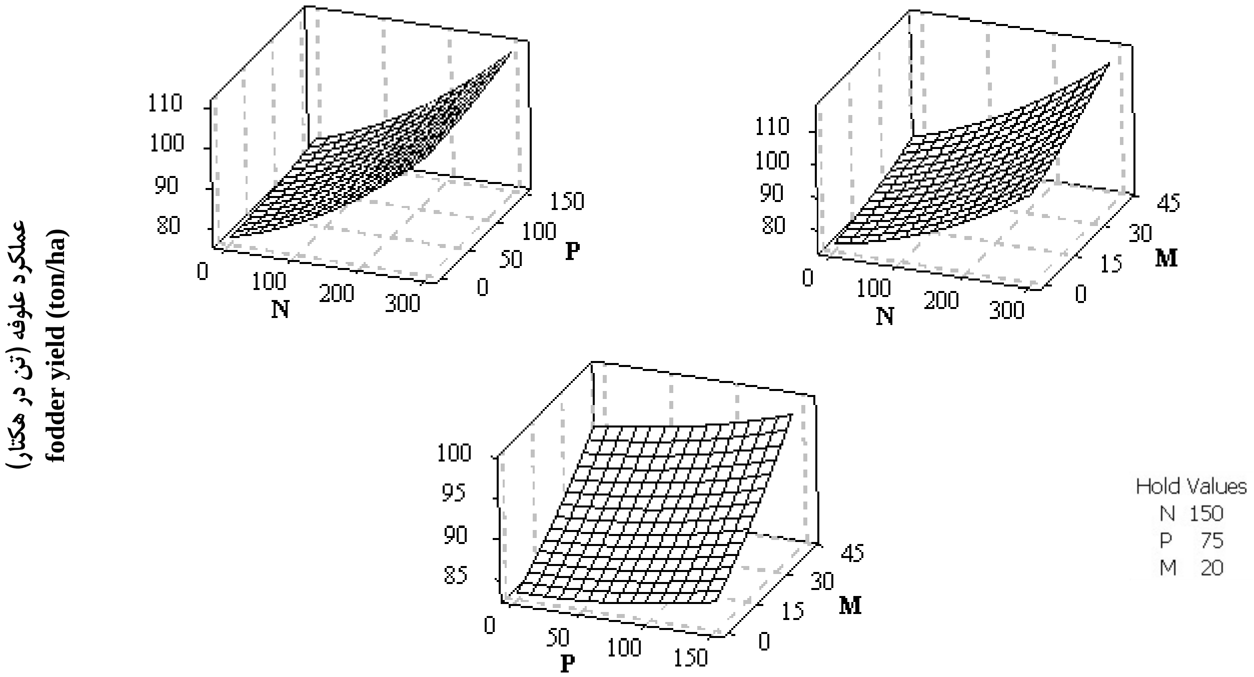
شکل ۳- نمودار سطح-پاسخ ماده خشک تحت تأثیر اثر متقابل دوگانه تیمارهای کود نیتروژن (N، کیلوگرم در هکتار)، فسفر (P، کیلوگرم در هکتار) و کود دامی (M، کیلوگرم در هکتار)

Figure 3- Response-surface plot of dry matter as affected by interaction of nitrogen (N, kg.ha^{-1}), phosphor (P, kg.ha^{-1}) and manure (M, kg.ha^{-1})

عملکرد علوفه

نتایج نشان داد که روند تغییرات عملکرد ذرت علوفه‌ای تحت تأثیر تیمارهای دوگانه کودی تقریبا به‌صورت خطی بود (شکل ۴). بررسی اثر برهمکنش کود نیتروژن × کود فسفر نشان داد که افزایش کود فسفر در سطوح بالای کود نیتروژن نسبت به سطوح پایین کود نیتروژن با شیب تندتری منجر به افزایش عملکرد علوفه می‌گردد. افزایش کود نیتروژن نیز منجر به افزایش عملکرد علوفه در تمام سطوح کود فسفر شد که این افزایش در سطوح بالای کود فسفر نسبت به سطوح پایین فسفر بیشتر بود (شکل ۴). این موضوع بیانگر این است که در صورت وجود نیتروژن کافی و در دسترس برای گیاه تأثیر فسفر در افزایش عملکرد علوفه ذرت بیشتر نمود پیدا می‌کند (Hawkesford & Barraclough, 2011). روند افزایش عملکرد علوفه تحت تأثیر اثر متقابل کود نیتروژن × کود دامی نیز مشابه اثر برهمکنش کود نیتروژن × کود فسفر می‌باشد؛ به‌طوری‌که افزایش کود نیتروژن در سطوح بالای کود دامی از عملکرد علوفه بیشتری نسبت به سطوح پایین کود دامی برخوردار بود. به نظر می‌رسد که افزایش عملکرد علوفه در سطوح بالای کود دامی در اثر مصرف کود نیتروژن علاوه بر افزایش عناصر موجود در کود دامی به خاک، به بهبود خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک بر اثر مصرف کود دامی که منجر به بهبود جذب عناصر، افزایش درصد تخلخل، کاهش وزن مخصوص ظاهری خاک و پایداری خاک‌دانه‌ها شده (Emdad, Tafteh, & Ghaffari Nejad, 2023; Mohiti Asl, 2011) و در نهایت افزایش عملکرد علوفه را به همراه داشته است. همان‌طور که در قبل نیز اشاره شد بالاترین شاخص سطح برگ در بالاترین سطوح مصرف کود نیتروژن و کود دامی به‌دست آمد؛ با توجه به این‌که بالاترین عملکرد علوفه نیز در بالاترین سطوح مصرف کود نیتروژن و

دامی حاصل شد، می‌توان عنوان کرد که مساحت بـرگ و بـه‌عبـارتی سطح فتوسنتزکننده تاثیر مستقیم و قابل‌تـوجهی بـر میـزان پتانسـیل تولید ذرت علوفه‌ای دارد و بنابراین بیشتر شدن میزان شاخص سـطح برگ در بالاترین سطوح کود نیتروژن و کـود دامـی موجـب افـزایش پتانسیل تولید ذرت علوفه ای شده و عملکرد علوفه را بهبـود بخشـیده است. اثر متقابل کود فسفر × کود دامـی بـر عملکـرد ذرت علوفـه‌ای حاکی از این بود که افزایش کود دامـی منجـر بـه افـزایش عملکـرد علوفه در سطوح مختلف کود فسفر می‌گردد، در صورتی‌که افزاش کود فسفر در تمام سطوح کود دامی تأثیری چنـدانی در افـزایش عملکـرد علوفه نداشت (شکل ۴).



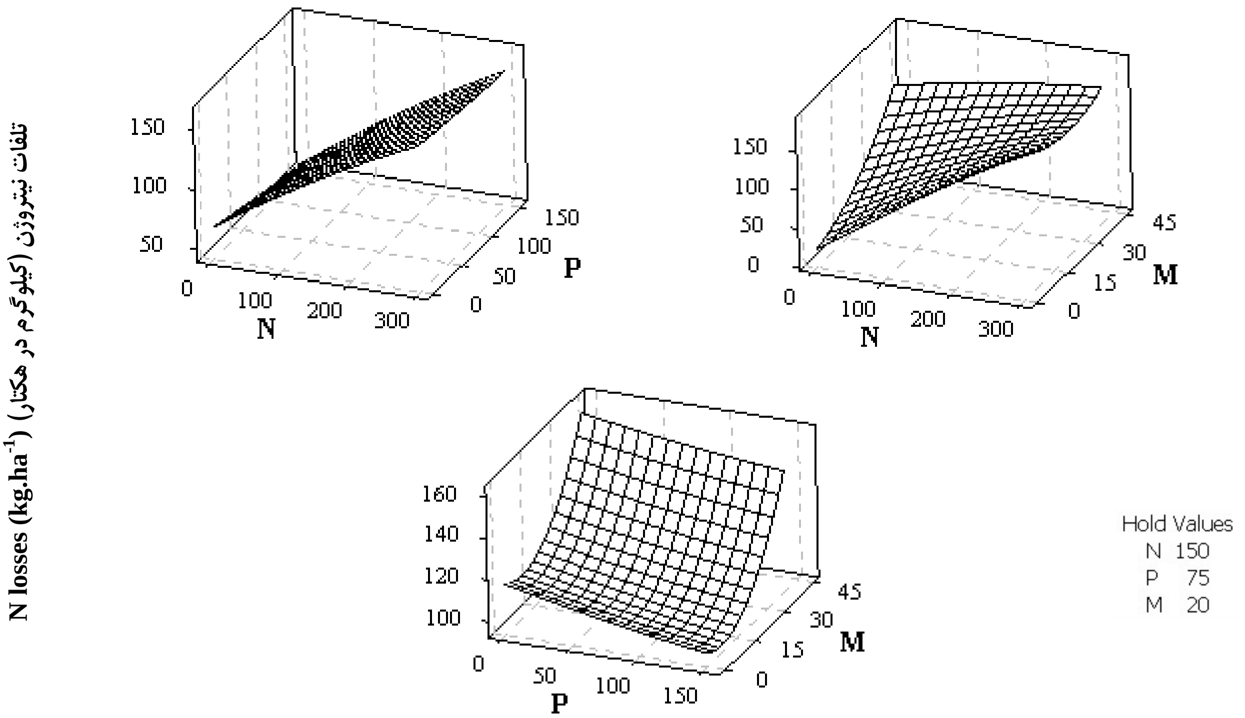
شکل ٤- نمودار سطح-پاسخ عملکرد علوفه تحت تأثیر اثر متقابل دوگانه تیمارهای کود نیتروژن (N، کیلوگرم در هکتار)، فسفر (P، کیلوگرم در هکتار) و کود دامی (M، کیلوگرم در هکتار)

Figure 4- Response-surface plot of fodder yield as affected by interaction of nitrogen (N, kg.ha^{-1}), phosphor (P, kg.ha^{-1}) and manure (M, kg.ha^{-1})

تلفات نیتروژن

بر اساس نمودار اثر متقابل کود نیتروژن × کود فسـفر بـر تلفـات نیتروژن، در سطوح مختلف کود فسفر تلفات نیتروژن با افزایش میزان مصرف کود نیتروژن افزایش یافت. با وجود این‌که افزایش کود فسـفر در سطوح پایین کـود نیتـروژن منجـر بـه کـاهش انـدکی در تلفـات نیتروژن گردید، ولی به‌طور کلی افزایش کود فسفر تقریباً تـأثیری بـر میزان تلفات نیتروژن در سطوح مختلف کود نیتروژن نداشـت (شـکل ۵). بر همکنش کود نیتروژن × کود دامی بر تلفات نیتروژن نیز حاکی از این بود که با افزایش کود نیتروژن در تمام سطوح کود دامی، میزان تلفات نیتروژن افزایش یافت، با این تفاوت که شـیب افـزایش تلفـات نیتروژن در سطوح پایین کود دامی تندتر از سطوح بالای مصرف کود دامی بود، به عبارت دیگر، مصرف کـود دامـی باعـث کـاهش تلفـات نیتروژن در سطوح بالای کود نیتروژن گردید؛ به‌طـوری‌کـه بیشـترین تلفات نیتروژن تحت تأثیر اثر متقابل کـود نیتـروژن × کـود دامـی در شرایط مصرف بالاترین سطح کود نیتروژن (۳۰۰ کیلوگرم در هکتـار) و عدم مصرف کود دامی به‌دست آمـد (شـکل ۵). بنـابراین مـی‌تـوان نتیجه گرفت که کاربرد توام کودهای شیمیایی اوره با مواد آلـی ماننـد کودهای دامی به سبب آهسـته و پیوسـته آزاد کـردن نیتـروژن و بـر همکنش با عوامل دیگر می‌تواند تلفـات ایـن عنصـر را کـاهش دهـد (Gastal & Lemaire, 2002). جهـان و همکـاران (Jahan *et al.*, 2016) نیز در بررسی اثرات سطوح مختلف کود نیتـروژن و دامـی بـر میزان تلفات نیتروژن در زراعت گندم پاییزه بیـان کردنـد کـه تلفـات نیتروژن به موازات افزایش سطوح کاربرد کود نیتروژن و دامی افزایش یافت. به‌طور کلی مقدار تلفات نیتروژن بسته به شرایط اقلیمی، خاکی و مدیریت گیاهی و همچنین اثرات متقابل بین ایـن عوامـل متفـاوت می‌باشد (Greer & Pittelkow, 2018). تلفـات نیتـروژن در مـزارع گیاهان بیشتر از طریق آبشـویی، روانـاب، دنیتریفیکاسـیون و تصـعید

آمونیومی (Akintoye, Klinga, & Lucas, 1999) اتفاق می‌افتد و کاربرد مقادیر بیشتر کود نیتروژن منجر بـه افـزایش تلفـات از طریـق روش‌های مـذکور مـی‌شـود. هالورسـون و همکـاران (Halvorson, Bartolo, Reule, & Berrada, 2008) و دیویـد و همکـاران (David, Drinkwater, & Mclsaac, 2010) گـزارش کردنـد کـه افزایش مصرف کود نیتـروژن پتانسـیل آبشـویی نیتـرات در خـاک را افزایش می‌دهد و آبشویی نیترات را یکی از مهم‌ترین مسیرهای تلفات نیتروژن در مزارع مطرح کردند. مطالعات انجـام‌گرفتـه بـر روی گیـاه ذرت نشان داده است که در مزارع ذرت نیز افـزایش ورودی نیتـروژن به خاک بـا افـزایش تلفـات نیتـروژن همـراه بـوده اسـت (Jaynes, Colvin, Karlen, Cambardella, & Meek, 2001; Helmers, Zhou, Baker, Melvin, & Lemke, 2012; Christianson & Harmel, 2015). لاولر و همکـاران (Lawlor, Helmers, Baker, Melvin, & Lemke, 2008) نیـز بـا انـدازه‌گیـری میـزان نیتـروژن موجود در آب زهکشی‌شده از مزرعـه ذرت بیـان کردنـد کـه افـزایش مصرف نیتروژن یکی از عوامل اصلی افزایش تلفات نیتـروژن بـوده و مهم‌ترین مسیر تلفات را آبشویی نیترات عنوان کردند. بررسی اثر کود فسفر × کود دامی نیز بیانگر افزایش تلفات نیتروژن با افزایش سـطوح کود دامی و کاهش تلفات نیتروژن با افزایش سطوح کود فسـفر بـود؛ البته توجه به این نکته ضروری است که کـاهش تلفـات نیتـروژن در صورت افزایش مصرف کود فسـفر بـا شـیب کنـدی اتفـاق افتـاد، در حالی‌که افزایش تلفات نیتروژن با بالا بردن میزان مصرف کود دامی با شیب تندی همراه بود. بنابراین بیشترین تلفات نیتـروژن تحـت تـأثیر برهمکنش کود فسفر × کود دامی در شرایط عدم مصرف کود فسفر و بالاترین سطح مصرف کود دامی مشاهده شد (شکل ۵). به‌طـور کلـی نتایج نشان داد که عنصر فسفر تاثیر اندکی بر کـاهش میـزان تلفـات نیتروژن داشت و اندک تاثیر آن را هم می‌توان به بهبـود رشـد ریشـه (Kim & Li, 2016) و در نتیجه بهبود جذب عناصر از جمله نیتروژن و در نتیجه کاهش تلفات این عنصر نسبت داد.



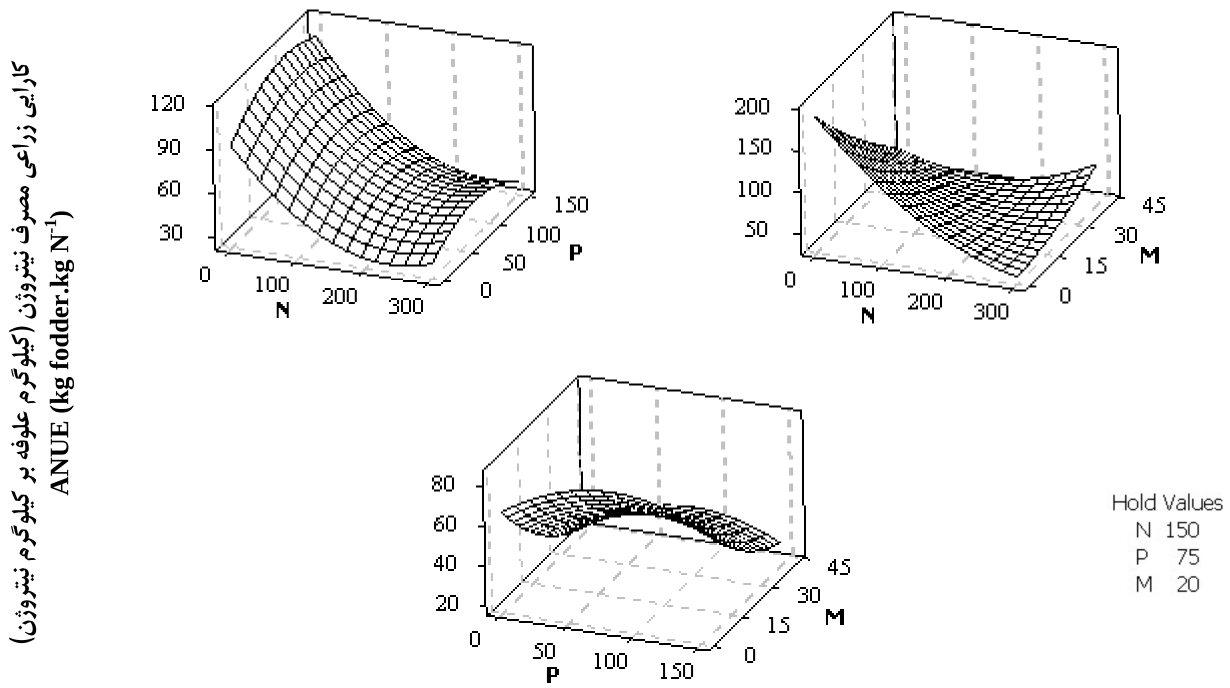
شکل ۵- نمودار سطح-پاسخ تلفات نیتروژن تحت تأثیر اثر متقابل دوگانه تیمارهای کود نیتروژن (N، کیلوگرم در هکتار)، فسفر (P، کیلوگرم در هکتار) و کود دامی (M، کیلوگرم در هکتار)

Figure 5- Response-surface plot of N losses as affected by interaction of nitrogen (N, kg.ha^{-1}), phosphor (P, kg.ha^{-1}) and manure (M, kg.ha^{-1})

کارایی زراعی مصرف نیتروژن

کارایی زراعی مصرف نیتروژن تحت اثر متقابل دوگانه تیمارهـای مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است. بر اساس اثـر متقابـل کـود نیتروژن × کود فسفر، افزایش مصـرف کـود نیتـروژن تـا حـدود ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار در تمامی سطوح کود فسفر، باعث کـاهش کـارایی زراعی مصرف نیتروژن گردید، در حـالی‌کـه در سـطوح مختلـف کـود نیتروژن افزایش کود فسفر تا حدود ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار منجـر بـه

افزایش کارایی زراعی مصرف نیتروژن شد. کاهش کارایی مصرف نیتروژن تحت تأثیر افزایش سطوح کود نیتروژن در سایر مطالعات (Jahan *et al*., 2016; Moraghebi, Akbari Famileh, & Houshmandfar, 2012; Marino *et al*., 2004) نیز گزارش شده است که با یافته‌های این تحقیق مطابقت دارد. با توجه به این‌که کارایی زراعی مصرف نیتروژن از کسر عملکرد علوفه بر میزان کود نیتروژن مصرفی حاصل می‌شود به نظر می‌رسد که افزایش کود فسفر از طریق افزایش عملکرد علوفه منجر به افزایش کارایی زراعی مصرف نیتروژن گردیده است. روند تغییرات کارایی زراعی مصرف نیتروژن با توجه به اثر کود نیتروژن × کود دامی نشان داد که در سطوح پایین کود دامی، بالا بردن میزان مصرف کود نیتروژن منجر به کاهش کارایی زراعی مصرف نیتروژن می‌گردد، در صورتی‌که در سطوح بالای کود دامی چنین روندی مشاهده نمی‌شود و با افزایش کود نیتروژن ابتدا کارایی زراعی مصرف نیتروژن با شیب بسیار کندی کاهش یافته و سپس افزایش می‌یابد که این موضوع بیانگر بهبود کارایی زراعی مصرف نیتروژن درنتیجه‌ی مصرف کود دامی می‌باشد (شکل ۶).



شکل ٦- نمودار سطح-پاسخ کارایی زراعی مصرف نیتروژن تحت تأثیر اثر متقابل دوگانه تیمارهای کود نیتروژن (N، کیلوگرم در هکتار)، فسفر (P، کیلوگرم در هکتار) و کود دامی (M، کیلوگرم در هکتار)

Figure 6- Response-surface plot of NUE as affected by interaction of nitrogen (N, kg.ha^{-1}), phosphor (P, kg.ha^{-1}) and manure (M, kg.ha^{-1})

بهینه‌سازی تیمارها

نتایج بهینه‌سازی تیمارها در سه سناریوی مختلف اقتصادی، زیست‌محیطی و اقتصادی-زیست‌محیطی در جدول ۶ آمده است. لازم به ذکر است که تفاوت سناریوهای مورد بررسی در میزان اهمیت متغیر پاسخ در هر سناریو می‌باشد؛ به‌طوری‌که در سناریوی اقتصادی، عملکرد علوفه؛ در سناریوی زیست‌محیطی، تلفات نیتروژن و در سناریوی اقتصادی-زیست‌محیطی، کارایی زراعی استفاده از نیتروژن به‌عنوان عوامل اصلی تعیین‌کننده مقدار بهینه تیمارها در نظر گرفته شدند. بر این اساس در سناریوی اقتصادی کاربرد ۲۴۲/۴۲ کیلوگرم نیتروژن در هکتار و ۹۵/۴۵ کیلوگرم فسفر در هکتار به همراه ۳۳/۱۳ تن در هکتار کود دامی توصیه شد که کاربرد این مقادیر منجر به تولید ۳۳/۹۷ تن در هکتار ماده خشک و ۱۰۵ تن در هکتار علوفه می‌گردد. در چنین شرایطی میزان شاخص سطح برگ ذرت برابر با ۵/۸۵، تلفات نیتروژن معادل ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار و کارایی زراعی مصرف نیتروژن برابر با ۴۶/۹۴ کیلوگرم علوفه به‌ازای کیلوگرم نیتروژن خواهد بود (جدول ۶).

جدول ٦- بهینه‌سازی مقادیر تیمارهای کودی نیتروژن، فسفر و دامی برای دستیابی به متغیرهای پاسخ در سناریوهای مختلف
Table 6- Optimization of the N, P fertilizers and manure to gain response variables under different scenarios

متغیرها Variables		سناریو Scenario اقتصادی Economic	زیست‌محیطی Environmental	اقتصادی-زیست‌محیطی Eco-environmental
متغیرهای مستقل Independent variables	نیتروژن N	242.42	0.0	78.79
	فسفر P	95.45	146.9	150
	کود دامی Manure	33.13	21.82	8.48
متغیرهای وابسته Dependent variables	شاخص سطح برگ LAI	5.85	4.84	4.89
	ماده خشک dry matter	33.97	25.07	29.66
	عملکرد علوفه Fodder yield	105	80.94	90.87
	تلفات نیتروژن N losses	150	51.2	64.75
	کارایی زراعی مصرف نیتروژن ANUE	46.94	103.03	116.4

در سناریوی زیست‌محیطی که هدف کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از مصرف کودهای شیمیایی بوده و تلفات نیتروژن به‌عنوان عامل اصلی تعیین‌کننده در این سناریو می‌باشد؛ عدم کاربرد کود نیتروژن، مصرف ۱۴۶/۹ کیلوگرم فسفر در هکتار و ۲۱/۸۲ تن کود دامی در هکتار برای دستیابی به ۴/۸۴ شاخص سطح برگ، ۲۵/۰۷ تن ماده خشک در هکتار، ۸۰/۹۴ تن علوفه در هکتار، ۵۱/۲ کیلوگرم در هکتار تلفات نیتروژن و کارایی زراعی مصرف نیتروژنی معادل ۱۰۳/۰۳ کیلوگرم علوفه به‌ازای کیلوگرم نیتروژن توسط مدل پیشنهاد شد (جدول ۶).

در سناریوی اقتصادی-زیست‌محیطی که تلفیقی از جنبه اقتصادی (عملکرد علوفه بالا) و جنبه زیست‌محیطی (کاهش تلفات نیتروژن) بوده و کارایی زراعی مصرف نیتروژن عامل اصلی موثر در انتخاب تیمارها در این سناریو بود؛ مصرف ۷۸/۷۹ کیلوگرم نیتروژن در هکتار، ۱۵۰ کیلوگرم فسفر در هکتار و ۸/۴۸ تن در هکتار کود دامی منجر به تولید ۹۰/۸۷ تن علوفه در هکتار با تلفات نیتروژنی برابر با ۶۴/۷۵ کیلوگرم در هکتار و بالاترین کارایی زراعی مصرف نیتروژن معادل ۱۱۶/۴ کیلوگرم علوفه به‌ازای کیلوگرم نیتروژن شد (جدول ۶). با توجه به این‌که سناریوی اقتصادی-زیست‌محیطی، مسائل اقتصادی و زیست‌محیطی را به‌طور هم‌زمان و توأم مدنظر قرار می‌دهد؛ به نظر می‌رسد که سطوح پیشنهادی تیمارها در این سناریو نسبت به دو سناریوی دیگر قابل‌توصیه‌تر باشند که این موضوع در تحقیقات مشابه توسط سایر محققین نیز پیشنهاد شده است (Jahan *et al*., 2016; Koocheki *et al*., 2013; Mansouri *et al*., 2014). بنابراین با توجه به نتایج کاربرد تیمارها بر اساس سناریوی اقتصادی-زیست‌محیطی (۷۸/۷۹ کیلوگرم نیتروژن در هکتار، ۱۵۰ کیلوگرم فسفر در هکتار و ۸/۴۸ تن در هکتار کود دامی) را می‌توان به‌عنوان مناسب‌ترین سطوح تیمارهای کود نیتروژن، فسفر و کود دامی در این مطالعه در نظر گرفت.

نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که بر اساس معیارهای ارزیابی و اعتبارسنجی مدل، روش سطح-پاسخ و رگرسیون درجه دو کامل استفاده شده در این مدل از توانایی و دقت کافی در برآورد صفات مورد مطالعه در گیاه ذرت علوفه‌ای برخوردار بود. تلفات نیتروژن با افزایش میزان مصرف کود نیتروژن افزایش یافت، ولی افزایش کود فسفر تأثیری بر میزان تلفات نیتروژن در سطوح مختلف کود نیتروژن نداشت. شیب افزایش تلفات نیتروژن در سطوح پایین کود دامی تندتر از سطوح بالای مصرف کود دامی بود، به عبارت دیگر، مصرف کود دامی باعث کاهش تلفات نیتروژن در سطوح بالای کود نیتروژن گردید. افزایش مصرف کود نیتروژن اگرچه باعث افزایش عملکرد علوفه ذرت گردید، ولی کارایی زراعی مصرف نیتروژن را کاهش داد. به‌طور کلی با توجه به این‌که سناریوی اقتصادی-زیست‌محیطی، به تولید ذرت علوفه‌ای با حداقل آلودگی‌های زیست‌محیطی تاکید دارد؛ به نظر می‌رسد که سطوح پیشنهادی تیمارهای کودی بر اساس این سناریو نسبت به دو سناریوی دیگر مناسب‌تر باشند، بنابراین مصرف ۷۸/۷۹ کیلوگرم نیتروژن در هکتار، ۱۵۰ کیلوگرم فسفر در هکتار و ۸/۴۸ تن در هکتار کود دامی به‌عنوان بهینه مصرف تیمارهای کود نیتروژن، فسفر و کود دامی در این تحقیق شناخته شدند.

سپاسگزاری

بخشی از هزینه‌های انجام این پژوهش توسط معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه فردوسی مشهد در قالب طرح شماره ۳/۳۹۹۴۶ مصوب ۱۳۹۵/۵/۲ تأمین شده است، که بدین‌وسیله قدردانی می‌شود.

References

1. Adesemoye, A. O., Torbert, H. A., & Klopper, J. W. (2009). Plant growth promoting rhizobacteria allow reduced application rates of chemical fertilizers. *Microbial Ecology, 58*, 921-929. https://doi.org/10.1007/s00248-009-9531-y
2. Akintoye, H. A., Klinga, J. G., & Lucas, E. O. (1999). N-use efficiency of single, double and synthetic maize lines grown at four N levels in three ecological zones of West Africa. *Field Crops Research, 60*, 189-199. https://doi.org/10.1016/s0378-4290(98)00122-1
3. Alexandratos, N., & Bruinsma, J. (2012). World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision. Global Perspective Studies Team, FAO Agricultural Development Economics Division.
4. Amiri, M.B., Jahan, M., & Rezvani-Moghaddam, P. (2022). An exploratory methodto determine the plant characteristics affecting the final yield of *Echium amoenum* Fisch. & C.A. Mey. under fertilizers application and plant densities. *Scientific Reports*, 12:1881. https://doi.org/10.1038/s41598-022-05724-8
5. Christianson, L. E., & Harmel, R. D. (2015). 4R water quality impacts: an assessment and synthesis of forty years of drainage nitrogen losses. *Journal of Environmental Quality, 44*, 1852-1860. https://doi.org/10.2134/jeq2015.03.0170
6. Cojocaru, C., & Zakrzewska-Trznadel, G. (2007). Response surface modeling and optimization of copper removal from aqua solutions using polymer assisted ultrafiltration. *Journal of Membrane Science, 298*, 56-70. https://doi.org/10.1016/j.memsci.2007.04.001
7. David, M. B., Drinkwater, L. E., & Mclsaac, G. F. (2010). Sources of nitrate yields in the Mississippi River basin. *Journal of Environmental Quality, 39*, 1657-1667. https://doi.org/10.2134/jeq2010.0115
8. Doberman, A., & Cassman, K. G. (2005). Cereal area, yield and nitrogen use efficiency are drives for future nitrogen fertilizer consumption. *Science in China, 48*, 745-758. https://doi.org/10.1007/BF03187115
9. Emdad, M. R., Tafteh, A., & Ghaffari Nejad, S. A. (2023). Effect of using organic fertilizer on the changes of soil physical properties in different rotations cultivation in permanent plots. *Water and Soil Management and Modeling*, Accepted Manuscript Available Online from 08 April 2023. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22098/mmws.2023.12491.1245
10. Fageria, N. K. (2014). *Nitrogen Management in Crop Production*. New York: CRC Press. ISBN: 978-1-4822-2283-8.
11. FAO. (2022). FAOSTAT. Land, Inputs and Sustainability. Available at: https://www.fao.org/faostat/en/#data/RFN
12. Gastal, F., & Lemaire, G. (2002). N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective. *Journal of Experimental Botany, 53(370)*, 789-799. https://doi.org/10.1093/jexbot/53.370.789
13. Greer, K. D., & Pittelkow, C. M. (2018). Linking Nitrogen Losses With Crop Productivity in Maize Agroecosystems. *Frontiers in Sustainable Food Systems, 2*(29), 1-9. https://doi.org/10.3389/fsufs.2018.00029
14. Halvorson, A. D., Bartolo, M. E., Reule, C. A., & Berrada, A. (2008). Nitrogen effects on onion yield under drip and furrow irrigation. *Agronomy Journal, 100*(4), 1062-1069. https://doi.org/10.2134/agronj2007.0377
15. Hawkesford, M. J., & Barraclough, P. (2011). *The Basis of Nutrient Use Efficiency in Crops*. WILEYBLACKWELL, USA. ISBN: 978-0-8138-1992-1.
16. Helmers, M. J., Zhou, X., Baker, J. L., Melvin, S. W., & Lemke, D. W. (2012). Nitrogen loss on tile drained Mollisols as affected by nitrogen application rate under continuous corn and corn-soybean rotations. *Canadian Journal of Soil Science, 92*, 493-499. https://doi.org/10.4141/cjss2010-043
17. Jafari Malekabadi, A., Afyuni, M., Mousavi, S. F., & Khosravi, A. (2004). Nitrate concentration in groundwater in Isfahan province. *Journal of Water and Soil Science, 8*(3), 69-83. (In Persian with English abstract). https://doi.org/20.1001.1.24763594.1383.8.3.6.1
18. Jahan, M., Nassiri Mahallati, M., Khalilzade, H., Bigonah, R., & Razavi, A. R. (2016). Optimizing of Nitrogen, Phosphorus and Cattle Manure Fertilizers Application in Winter Wheat Production Using Response-Surface Methodology (RSM). *Iranian Journal of Field Crops Research, 13*(4), 823-839. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/gsc.v13i4.39788
19. Jahan, M., & Amiri, M.B. (2018). Optimizing application rate of nitrogen, phosphorus and cattle manure in wheat production: An approach to determine optimum scenario using response-surface methodology. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 18*(1), 13-26. https://doi.org/10.4067/S0718-95162018005000102
20. Jarvis, S., Hutchings, N., Brentrup, F., Olesen, J. E., & Van Der Hock, K. W. (2011). *Nitrogen flows in farming systems across Europe. In: The European Nitrogen Assessment: source, effects and policy perspectives*. Sutton, M.A., Howard, C. M., Erisman, J. W., Billen, G., Bleeker, G., Grennfelt, A., Grinsven, H. V., & Grizzetti, B. (2011). Cambridge University Press. Part III, Chapter 10.
21. Jaynes, D. B., Colvin, T. S., Karlen, D. L., Cambardella, C. A., & Meek, D. W. (2001). Nitrate loss in subsurface drainage as affected by nitrogen fertilizer rate *Journal of Environmental Quality, 30*, 1305-1314. https://doi.org/10.2134/jeq2001.3041305x

22. Kalavathy, H. M., Regupathib, I., Pillai, M. G., & Miranda, L. R. (2009). Modelling, analysis and optimization of adsorption parameters for H_3PO_4 activated rubber wood sawdust using response surface methodology (RSM). *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 70*, 35-45. https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2008.12.007
23. Karmoker, J. R., Hasan, I., Ahmed, N., Saifuddin, M., & Reza, M. S. (2019). Development and Optimization of Acyclovir Loaded Mucoadhesive Microspheres by Box -Behnken Design. *Dhaka University Journal of Pharmaceutical Sciences, 18*(1), 1-12. https://doi.org/10.3329/dujps.v18i1.41421
24. Khodshenas, M. A., Ghadbeiklou, J., & Dadivar, M. (2016). The Effects of Source and Rate of Nitrogen Fertilizer and Irrigation on Nitrogen Uptake of Silage Corn and Residual Soil Nitrate. *Journal of Water and Soil, 29*(6), 1640-1650. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jsw.v29i6.35254
25. Kim, H. J., & Li, X. (2016). Effects of Phosphorus on Shoot and Root Growth, Partitioning, and Phosphorus Utilization Efficiency in Lantana. *Hortscience, 51*(8), 1001-1009. https://doi.org/10.21273/hortsci.51.8.1001
26. Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., Moradi, A., & Mansouri, H. (2013). Optimization of water, nitrogen and density in canola cultivation by central composite design. *Journal of Agroecology, 3*(1), 1-16. (in Persian with English abstract).
27. Lawlor, P. A., Helmers, M. J., Baker, J. L., Melvin, S. W., & Lemke, D. W. (2008). Nitrogen application rate effect on nitrate-N concentration and loss in subsurface drainage for a corn-soybean rotation. *Trans. ASABE, 51*, 83-94. https://doi.org/10.13031/2013.24229
28. Mansouri, H., Bannayan, M., Rezvani Moghaddam, P., & Lakzian, A. (2014). Management of nitrogen fertilizer, irrigation and plant density in onion production using response surface methodology as optimization approach. *African Journal of Agricultural Researc, 9*(7), 676-687. https://doi.org/10.5897/ajar2013.8428
29. Marino, M. A., Mazzanti, A., Assuero, S. G., Gastal, F., Echeverria, H. E., & Andrade, F. (2004). Nitrogen dilution curves and nitrogen use efficiency during winter-spring growth of annual ryegrass. *Agronomy Journal, 96*, 601-607. https://doi.org/10.2134/agronj2004.0601
30. Mirzashahi, K., & Hossainpour, M. (2014). The effect of nitrogen fertilization management on grain yield and nitrogen efficiency indices in corn. *Agronomy Journal (Pajouhesh & Sazandegi), 102*, 31-40. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22092/aj.2014.100926
31. Mohiti Asl, A. (2011). Effect of cow manure, biological and chemical fertilizers on some physic-chemical properties of soil and yield of forage corn in Amiran of Damgha. MSc thesis. Shahrood university. 139 p. (in Persian with English abstract).
32. Moraghebi, F., Akbari Famileh, M., & Houshmandfar, A. (2012). The effect of amount and time of Nitrogen use on the percentage of grain protein and efficiency use of Nitrogen of the Pishtaz cultivar wheat in Saveh region. *Plant and Ecosystem, 7*(29), 65. (in Persian with English abstract).
33. Myers, R. H., & Montgomery, D. C. (1995). *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*. John Willey & Sons, New York, USA.
34. Nelson, D. W., & Somers, L. E. (1973). Determination of total nitrogen in plant material. *Agronomy Journal, 65*, 109-112. https://doi.org/10.2134/agronj1973.00021962006500010033x
35. Rathke, G. W., Behrens, T., & Diepenbrock, W. (2006). Integrated nitrogen management strategies to improve seed yield, oil content and nitrogen efficiency of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): A review. *Agriculture, Ecosystems and Environment, 117*, 80-108. https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.04.006
36. Sadat-Rozati, N. (2008). The evaluation of the effect of consumption management of urea fertilizer on yield and component of yield in three cultivar of maize. MSc thesis. Shahrood University of Technology. (In Persian with English abstract).
37. Torbert, H. A., Potter, K. N., & Morrison, J. E. (2001). Tillage system, fertilizer nitrogen rate and timing effect on corn yields in the Texas Blackland prairie. *Agronomy Journal, 93*, 1119-1124. https://doi.org/10.2134/agronj2001.9351119x
38. Weligama, C., Sale, P. W. G., Conyers, M. K., Liu, D. L., & Tang, C. (2010). Nitrate leaching stimulates subsurface root growth of wheat and increase rhizosphere alkalization in a highly acidic soil. *Plant and Soil, 328*, 119-132. https://doi.org/10.1007/s11104-009-0087-x
39. Zhou, M., & Butterbach-Bahl, K. (2014). Assessment of nitrate leaching loss on a yield-scaled basis from maize and wheat cropping systems. *Plant Soil, 374*, 977-991. https://doi.org/10.1007/s11104-013-1876-9